Ecotoxicol. Environ. Contam., v. 21, n. 1, 2026, 104 - 117
doi: 10.5132/eec.2026.01.09

Original Article

Assessment of the Phytotoxicity of Elutriate from the Fine Fraction of Landfill-Mined Material Using Seed Bioassays

Anaxsandra da Costa Lima Duarte [1,2], Taise Bomfim de Jesus[1], Alessandra Cristina Silva Valentim[2]

[1] Universidade Federal de Feira de Santana (UEFS), Feira de Santana, BA, Brazil
[2] Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Cruz das Almas, BA, Brazil

Received March 25, 2026; Accepted September 29, 2026

Abstract

Landfill-mined-soil-like-fractions (LFMSF) derived from landfill mining, have potential for environmental reuse; however, their biological effects remain poorly understood, highlighting the need for ecotoxicological assessment. This study investigated the phytotoxicity of the LFMSF elutriate (E-LFMSF) using bioassays with *Allium cepa*, *Solanum lycopersicum*, and *Eruca sativa* seeds, considering germination and root elongation as biological endpoints. Germination did not differ significantly from the control ($p > 0.05$) for any of the species. In contrast, root elongation differed significantly among E-LFMSF concentrations ($p < 0.05$), revealing species-dependent sublethal effects. *Allium cepa* exhibited a response consistent with hormesis, characterized by stimulation at intermediate concentrations followed by attenuation at higher concentrations. In contrast, *Eruca sativa* maintained stimulated root growth across the entire concentration range evaluated. *Solanum lycopersicum* showed a predominantly inhibitory response at the highest concentrations, with toxicity ranging from low to moderate. These findings demonstrate that E-LFMSF induces species-dependent sublethal effects on root development, highlighting the importance of multi-species approaches and root elongation as a sensitive endpoint for the ecotoxicological assessment of waste-derived materials intended for environmental reuse.

Keywords: Sublethal phytotoxicity; hormesis; root elongation; germination.

*Corresponding author: anaxsandra@ufrb.edu.br

Avaliação da Fitotoxicidade do Elutriato da Fração Fina Minerada de Aterros Sanitários em Bioensaios com Sementes

Resumo

A Fração Fina do Minerado (FFM), proveniente da mineração de aterros sanitários, apresenta potencial para reaproveitamento ambiental, porém seus efeitos biológicos ainda são pouco conhecidos, exigindo avaliação ecotoxicológica. Este estudo investigou a fitotoxicidade do elutriato da FFM (EFFM) por meio de bioensaios com sementes de *Allium cepa*, *Solanum lycopersicum* e *Eruca sativa*, utilizando germinação e alongamento radicular como parâmetros biológicos. A germinação não diferiu significativamente do controle ($p > 0,05$) para todas as espécies. Em contraste, o alongamento radicular apresentou diferenças significativas entre concentrações ($p < 0,05$), revelando efeitos subletais dependentes da espécie. *A. cepa* apresentou padrão compatível com resposta hormética, caracterizado por estímulo em concentrações intermediárias seguido de redução desse efeito em concentrações mais elevadas, enquanto *E. sativa* manteve estímulo do crescimento radicular em toda a faixa de concentrações avaliada. *S. lycopersicum* apresentou resposta predominantemente inibitória nas maiores concentrações, com toxicidade classificada como baixa a moderada. Os resultados indicam que o EFFM promove efeitos subletais espécie-dependentes no desenvolvimento radicular, reforçando a importância de abordagens multiespécies e da utilização do alongamento radicular como endpoint mais sensível para a avaliação ecotoxicológica de materiais residuais destinados ao reaproveitamento ambiental.

Palavras-chave: Fitotoxicidade subletal; hormese; alongamento radicular; germinação.

INTRODUÇÃO

O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento estima que, apenas em 2021, aproximadamente 101,2 milhões de toneladas de resíduos sólidos foram coletadas no Brasil, das quais cerca de 70,1 milhões de toneladas foram dispostas em lixões, aterros controlados e em aterros sanitários (SNIS, 2022). De maneira simplificada, o aterro sanitário constitui o destino final de resíduos que ainda contêm materiais potencialmente aproveitáveis como matéria-prima secundária. Entretanto, devido à geração de gases e lixiviados, permanece como uma fonte potencial de impactos ambientais, mesmo após seu encerramento. No modelo convencional de gerenciamento de resíduos, essa etapa representa o fim do ciclo de vida dos produtos.

Nesse cenário, a Mineração de Aterros Sanitários (MAS) tem sido proposta como estratégia para lidar com esse passivo ambiental, uma vez que os resíduos são reescavados, classificados e beneficiados, com o objetivo de se obter a maior quantidade possível de materiais recicláveis e de recursos energéticos, por meio de modernas tecnologias de separação e processamento, para devolvê-los ao ciclo produtivo (Krook *et al.*, 2012; Krook & Baas, 2013; Wolfsberger *et al.*, 2015). A MAS teve início em Israel, em 1953, como uma alternativa para obtenção de fertilizantes destinados a pomares (Krook *et al*., 2012). Contudo, apenas a partir da década de 1990 a técnica voltou a despertar interesse. Inicialmente, as iniciativas concentravam-se na recuperação de metano e na mitigação da liberação de contaminantes para o solo e para as águas subterrâneas, sem envolver a remoção dos resíduos.

Posteriormente, consolidou-se a mineração de aterros *ex situ*, caracterizada pela recuperação de recursos por meio da escavação parcial ou total dos resíduos previamente dispostos no aterro (Jones *et al.*, 2013). Entretanto, a aplicação ambientalmente segura dos materiais escavados depende de avaliação robusta de riscos. Embora essencial, a caracterização química apresenta limitações, pois não contempla a biodisponibilidade dos contaminantes nem seus efeitos biológicos. Evidências demonstram que a redução das concentrações químicas não implica necessariamente na eliminação do risco biológico (Rede *et al.*, 2016). Nesse contexto, a avaliação ecotoxicológica torna-se fundamental para complementar análises físico-químicas em matrizes complexas, especialmente no que se refere à Fração Fina do Minerado (FFM).

A FFM é composta por partículas com características geotécnicas semelhantes ao solo, e resulta da combinação de três componentes principais: (a) produtos finais da decomposição químico-termo-biológica dos resíduos; (b) resíduos provenientes do material de cobertura; e (c) pequenas

partículas de metal, vidro e cerâmica que não podem ser separadas por processos manuais ou mecânicos (Chandana *et al*., 2021; Masi *et al*., 2014). Na literatura, a FFM é geralmente definida como a fração com partículas inferiores a 10-60 mm, dependendo do sistema de peneiramento adotado, e representa de 40 a 80% da massa total de resíduos escavados (Parrodi *et al.*, 2018) . No Brasil essa porcentagem, considerando o passante na peneira de 19 mm, foi de 35,6%, 32,8% e 37,2% para resíduos com 8, 10 e 24 anos de aterramento, respectivamente (Duarte *et al*., 2025; Leme *et al.*, 2021; Takeda *et al*., 2022).

Apesar do avanço recente, a literatura ainda apresenta resultados divergentes quanto à adequação ambiental da FFM, particularmente no que se refere à sua aplicação direta no solo. Estudos conduzidos na Índia, Itália e Estônia relatam resultados heterogêneos que indicam desde baixa fitotoxicidade até restrições para uso agrícola direto (Masi *et al*., 2014; Orupõld *et al.*, 2022; Prechthai *et al.*, 2008; Singh & Chandel, 2022; Zhou, Xu, *et al.*, 2015).

Essa variabilidade decorre tanto das diferenças físico-químicas do material quanto das condições de disposição final, especialmente em aterros antigos e lixões, onde a ausência de controle operacional aumenta a heterogeneidade química e biológica dos resíduos, ampliando as incertezas quanto ao seu reaproveitamento ambiental (Burlakovs *et al.*, 2016; Parrodi *et al*., 2018; Vocht & Descamps, 2011; Zhou, Gong *et al*., 2015). Os ensaios de germinação de sementes e crescimento radicular são amplamente empregados na avaliação ecotoxicológica de matrizes ambientais, devido à sua sensibilidade, rapidez, simplicidade operacional e baixo custo (Lääne, 2014; Šourková *et al.*, 2020). Entre esses parâmetros, o crescimento radicular é considerado um endpoint mais sensível, por refletir diretamente a exposição das raízes aos contaminantes presentes no meio (Bożym, 2020). A aplicação conjunta desses endpoints fornece uma avaliação mais abrangente do potencial fitotóxico de matrizes complexas, como o elutriato da fração fina minerada (EFFM), cuja complexidade pode influenciar o desenvolvimento inicial das plantas.

Assim, este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos do elutriato da Fração Fina do Minerado (EFFM) sobre a germinação e o alongamento radicular de *Allium cepa*, *Eruca sativ*a e *Solanum lycopersicum* visando investigar seu potencial fitotóxico e gerar subsídios para a avaliação do uso geoambiental da FFM como material de biocobertura em aterros sanitários. Dessa forma, o estudo contribui para reduzir a lacuna de conhecimento acerca da avaliação ecotoxicológica da FFM, particularmente em condições representativas do contexto brasileiro.

MATERIAL E MÉTODOS

Espécies vegetais

A fitotoxicidade da Fração Fina do Minerado (FFM) foi avaliada por meio de ensaios de germinação e crescimento radicular utilizando sementes de cebola (*A. cepa*), tomate (*S. lycopersicum*) e rúcula (*E. sativa*). As sementes, da marca ISLA®, adquiridas em estabelecimento comercial local, apresentavam pureza física superior a 95% e não foram submetidas a aditivos químicos, incluindo fungicidas, inseticidas ou outros aditivos, e eram comercializadas como sementes não transgênicas. Previamente aos ensaios, realizou-se seleção manual para exclusão de sementes danificadas, malformadas ou com coloração alterada, visando reduzir a variabilidade experimental.

As espécies foram selecionadas com base em sua ampla utilização em ensaios ecotoxicológicos e reconhecida sensibilidade a contaminantes ambientais. *A. cepa* é amplamente empregada como organismo-teste em monitoramento ambiental, inclusive de lixiviados, apresentando efeitos fitotóxicos associados a metais (Sales Junior *et al*., 2024). *S. lycopersicum* tem sido utilizada em estudos de fitotoxicidade associados a fármacos e contaminantes emergentes (Cicirma *et al.*, 2025). *E. sativa* apresenta elevada sensibilidade à presença de pesticidas em solo e elutriatos (Alexandre *et al*., 2023).

Obtenção da Fração Fina do Minerado e preparo do elutriato

A Fração Fina do Minerado (FFM) utilizada neste estudo foi obtida por Duarte *et al*. (2025) e corresponde ao material passante na peneira de 19 mm, proveniente do processamento de uma amostra representativa de aproximadamente 650 kg de resíduos escavados de um aterro sanitário localizado no Recôncavo da Bahia, Brasil.

O elutriato da FFM (EFFM) foi preparado pela mistura da FFM previamente seca ao ar, por 72 horas, com água destilada na proporção sólido:líquido de 1:4 (m/m), seguindo a NBR 15469 (ABNT, 2021). A suspensão foi submetida à agitação mecânica por 20 h a 150 rpm, seguida de repouso por 1 h para sedimentação. O sobrenadante foi então centrifugado por 30 min a 3.950 rpm (2.026 G). Foram determinados os valores de pH e condutividade elétrica do elutriato, utilizando medidores digitais de bancada previamente calibrados conforme especificações do fabricante.

Ensaio de germinação e crescimento radicular

Os ensaios foram conduzidos com base no protocolo proposto por Tiquia (2000), com adaptações experimentais. O número de sementes utilizadas variou conforme a espécie vegetal e está apresentado na Tabela 1. Esta variação serviu para equilibrar o tamanho de cada tipo de semente com o espaço disponível para germinarem (Tiquia, 2000). Nos ensaios preliminares, cada concentração do EFFM foi avaliada em três placas de Petri (n = 3), enquanto nos ensaios definitivos foram utilizadas cinco placas de Petri por concentração (n = 5).

Tabela 1. Definição de parâmetros para ensaio com sementes.

Semente	Nº de sementes por placa	Tempo de germinação (horas)
Allium cepa	12	168
Solanum lycopersicum	15	120
Eruca sativa	15	168

Inicialmente, realizaram-se ensaios preliminares com concentrações de 0, 10, 25, 50, 75 e 100% de EFFM, visando identificar a faixa de resposta biológica e subsidiar a definição das concentrações utilizadas nos ensaios definitivos. Com base nos resultados de crescimento radicular, foram definidas as concentrações do ensaio definitivo, organizadas em progressão geométrica (Tabela 2).

Tabela 2. Concentrações de EFFM para execução dos ensaios definitivos

Sementes	Concentrações de EFFM(%)	Razão q
Allium cepa *Solanum lycopersicum*	0; 50,0; 57,50; 66,12; 76,04; 86,45; 100	1,14
Eruca sativa	0; 22,3; 30,1; 40,6; 54,9; 74,1; 100	1,35

As sementes foram distribuídas sobre papel-filtro disposto em placas de Petri (9,5 cm de diâmetro), previamente umedecido com 5 mL da solução correspondente à concentração de EFFM avaliada ou, no tratamento controle, com água destilada. As placas foram vedadas com filme plástico para minimizar a perda de umidade e incubadas a 25 °C, na ausência de luz. A germinação foi considerada quando a radícula atingiu comprimento ≥ 2 mm ao término do tempo de germinação (TG) específico para cada espécie (Tabela 1). Ao final do TG, foi determinado o número de sementes germinadas, e o comprimento radicular foi mensurado com paquímetro digital.

Índices de fitotoxicidade

A partir dos dados de germinação e crescimento radicular, foram calculados dois índices de fitotoxicidade: o Índice de Germinação Residual Normalizado (IGN) e o Índice de Alongamento Radicular Residual Normalizado (IER), conforme as Equações 1 e 2 propostas por Bagur-González *et al.* (2011):

$$IGN = \frac{Germinação_{amostra} - Germinação_{controle}}{Germinação_{controle}} \quad \textbf{Eq 1}$$

$$IER = \frac{Alongamento_{amostra} - Alongamento_{controle}}{Alongamento_{controle}} \quad \textbf{Eq 2}$$

A interpretação dos índices de germinação (IGN) e de alongamento radicular (IER) foi realizada de acordo com os intervalos propostos por Bagur-González *et al*. (2011) (Tabela 3). Valores positivos indicam resposta hormética, enquanto valores negativos representam níveis crescentes de fitotoxicidade.

Tabela 3. Níveis de fitotoxicidade.

IGN e IER = x	Nível de fitotoxicidade
$x > 0$	Resposta hormética[1]
$-0{,}25 < x < 0$	Toxicidade baixa
$-0{,}50 < x < -0{,}25$	Toxicidade moderada
$-0{,}75 < x < -0{,}50$	Toxicidade alta
$-1{,}00 < x < -0{,}75$	Toxicidade muito alta

Nota: [1] indica baixas concentrações de contaminantes, não prejudicando os organismos-teste.

Análise estatística

A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Shapiro–Wilk. Como os pressupostos paramétricos não foram atendidos, empregou-se o teste não-paramétrico de Kruskal–Wallis para verificar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. Quando identificadas diferenças significativas ($p < 0{,}05$), realizaram-se comparações pareadas entre os tratamentos por meio do teste de Mann-Whitney. Todos os testes estatísticos foram realizados utilizando o software gratuito e de código aberto The Jamovi Project, versão 2.6.44 (2024).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ensaios preliminares

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam o alongamento radicular das plântulas submetidas às diferentes concentrações de elutriato nos ensaios preliminares. Não foi observada inibição completa do crescimento

radicular em nenhuma das espécies avaliadas. De modo geral, verificou-se variação no alongamento das raízes em função das concentrações testadas, indicando respostas espécie-dependentes frente à exposição ao elutriato.

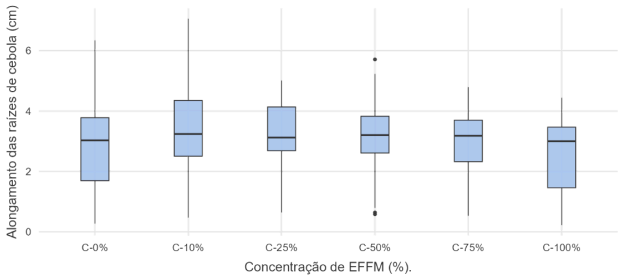


Figura 1. Alongamento das raízes de *A. cepa* no ensaio preliminar

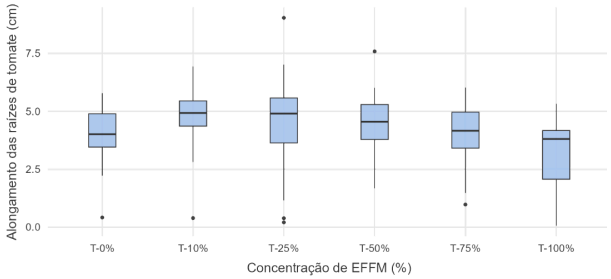


Figura 2. Alongamento das raízes de *S. lycopersicum* no ensaio preliminar

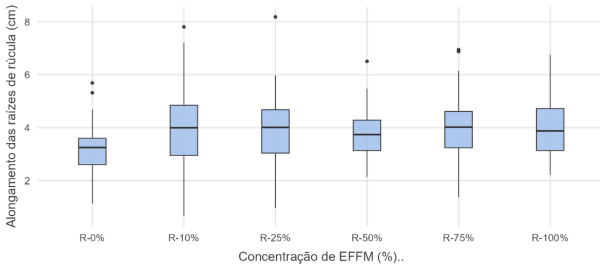


Figura 3. Alongamento das raízes de *E. sativa* no ensaio preliminar

No alongamento das raízes de *S. lycopersicum*, por exemplo, os dados mostram que o crescimento aumenta do tratamento-controle para os tratamentos com 10 e 25% de EFFM e diminui em 50%, embora ainda permaneça superior ao o controle (4,6 contra 4,0 cm). Assim, não houve redução em relação ao controle, e sim em relação ao pico observado em 10 e 25%.

Em *E. sativa*, o crescimento radicular permaneceu superior ao controle em todas as concentrações avaliadas, embora tenha ocorrido redução na concentração de 25% em comparação com a de 10% de EFFM. Esses resultados foram utilizados para definir as faixas de concentração empregadas nos ensaios definitivos, buscando maior resolução experimental nas concentrações em que foram observadas alterações no crescimento radicular.

A utilização do alongamento radicular como critério para definição das concentrações dos ensaios definitivos fundamenta-se na elevada sensibilidade deste endpoint para detectar alterações fisiológicas precoces decorrentes da exposição a contaminantes. Diferentemente da germinação, que depende principalmente das reservas nutricionais da semente durante os estágios iniciais do desenvolvimento, o crescimento radicular reflete diretamente a interação entre a plântula e o meio de exposição, permitindo identificar efeitos subletais mesmo na ausência de redução da viabilidade germinativa (Lyu *et al*., 2018; Pan & Chu, 2016; Sales Junior *et al.*, 2024).

Caracterização físico-química dos tratamentos selecionados

Após a definição das concentrações empregadas nos ensaios definitivos, as diluições correspondentes foram caracterizadas quanto ao pH e à condutividade elétrica (CE). A CE apresentou aumento proporcional à concentração de elutriato da FFM, variando de 946,0 a 3062,1 µS.cm^{-1}, enquanto o pH aumentou de aproximadamente 7,2 para valores próximos a 8,0, indicando uma tendência de alcalinização do meio com o aumento da proporção de elutriato (Figura 4). O controle, sem nenhuma adição de EFFM, apresentou valores de CE igual a 3,2 µS.cm^{-1} e

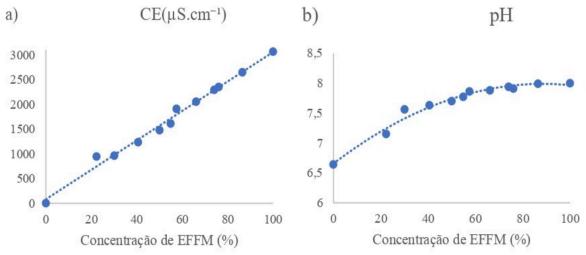


Figura 4. Variação da Condutividade Elétrica - CE (a) e pH (b) em função da concentração de EFFM

O aumento progressivo da CE evidencia maior disponibilidade de íons dissolvidos à medida que aumenta a proporção de elutriato. Embora o pH tenha permanecido próximo da neutralidade, os valores de CE alcançaram níveis superiores a 3000,0 µS.cm^{-1} na maior concentração avaliada, condição que pode contribuir para alterações fisiológicas nas plântulas. Estudos anteriores demonstram que a salinidade frequentemente exerce influência mais pronunciada sobre a resposta fitotóxica do que o teor total de elementos

potencialmente tóxicos, especialmente em materiais estabilizados (Chelinho *et al.*, 2019).

Ensaios definitivos

Os resultados de germinação (Figuras 5, 6 e 7) demonstram que, embora existam diferenças numéricas entre os tratamentos, não foram detectadas diferenças estatisticamente significativas entre os grupos avaliados. (teste de Kruskal-Wallis: p = 0,408 para *A. cepa*; p = 0,955 para *S. lycopersicum*; p = 0,521 para *E. sativa*). O Índice de Germinação (IGN) corroborou esses achados, indicando baixo nível de toxicidade ou ausência de efeito hormético para todas as concentrações avaliadas (Figura 8).

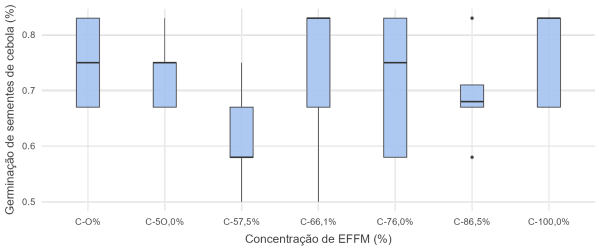


Figura 5. Germinação de sementes de *A. cepa* no ensaio definitivo.

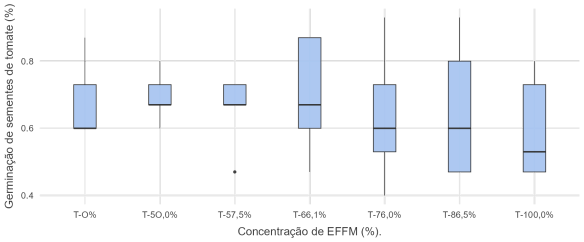


Figura 6. Germinação de sementes de *S. lycopersicum* no ensaio definitivo.

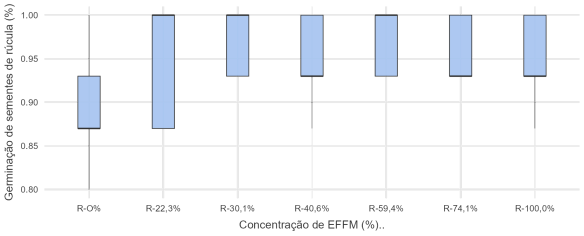


Figura 7. Germinação de sementes de *E. sativa* no ensaio definitivo.

A ausência de diferenças significativas na germinação indica que o elutriato da FFM não comprometeu a viabilidade inicial das sementes nas condições experimentais avaliadas. Esse comportamento tem sido frequentemente relatado em estudos de fitotoxicidade, nos quais a germinação apresenta menor sensibilidade do que o crescimento radicular.

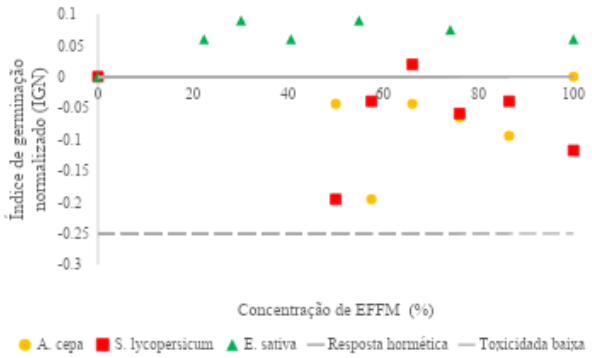


Figura 8. Índice de Germinação Residual Normalizado para as três espécies de sementes analisadas. Nota: Valores positivos de IGN indicam resposta hormética; valores negativos indicam fitotoxicidade crescente conforme Bagur-González *et al.* (2011). Os valores observados restringiram-se às faixas de resposta hormética e toxicidade baixa.

Uma possível explicação é que, durante as etapas iniciais da germinação, o embrião permanece parcialmente protegido pelo tegumento da semente e utiliza predominantemente reservas internas, reduzindo a influência imediata dos contaminantes presentes no meio de exposição (Bożym, 2020; Pan & Chu, 2016). Resultados semelhantes foram observados por Klauck *et al.* (2015), Moreira *et al.* (2008) e Hofstätter *et al.* (2024), que também não verificaram diferenças significativas na germinação, embora tenham registrado alterações posteriores no desenvolvimento radicular.

Em contraste, os resultados de alongamento radicular evidenciaram diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos para todas as espécies. O teste de Kruskal-Wallis indicou diferença significativa entre os grupos de sementes de *S. lycopersicum* (p = 0,018) e de *A. cepa* e *E. sativa* (p < 0,001), indicando que o alongamento radicular respondeu significativamente às diferentes concentrações de EFFM nas três espécies avaliadas.

Solanum lycopersicum

Observou-se redução progressiva do alongamento radicular com o aumento da concentração de EFFM (Figura 9). As medianas diminuíram de 4,70 cm no controle para valores entre 3,40 e 3,90 cm nas concentrações iguais ou superiores a 66,1%. As comparações pareadas pelo teste de Mann-Whitney indicaram diferenças significativas entre o controle e as concentrações de 66,1%, 76,0%, 86,5% e 100% de EFFM (p < 0,05).

Por outro lado, não foram observadas diferenças significativas entre essas concentrações (p > 0,05), sugerindo estabilização da resposta inibitória do alongamento radicular em níveis mais elevados de

exposição. Em conjunto, esses resultados indicam a existência de um limiar de resposta entre 57,5% e 66,1% de EFFM, a partir do qual a redução do alongamento radicular torna-se estatisticamente detectável em relação ao controle.

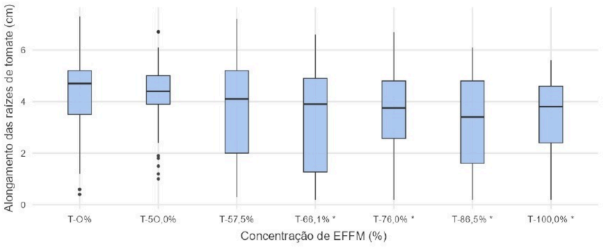


Figura 9. Alongamento das raízes de *S. lycopersicum* no ensaio definitivo. * Diferença significativa em relação ao controle (Mann-Whitney, $p < 0,05$)

O comportamento observado em *S. lycopersicum* indica maior sensibilidade ao elutriato quando comparado às demais espécies avaliadas. Respostas semelhantes foram descritas por Khelil *et al.* (2022), que observaram redução progressiva do alongamento radicular em concentrações elevadas de águas residuárias, e por Klauck *et al.* (2015), que relataram diminuição significativa do crescimento radicular em plantas expostas ao lixiviado de aterro, mesmo na ausência de efeitos sobre a germinação.

Allium cepa

A análise descritiva revelou aumento progressivo do alongamento radicular até a concentração de 66,1% de EFFM, na qual foi observada a maior mediana (3,52 cm), seguida de redução do estímulo nas concentrações mais elevadas (Figura 10).

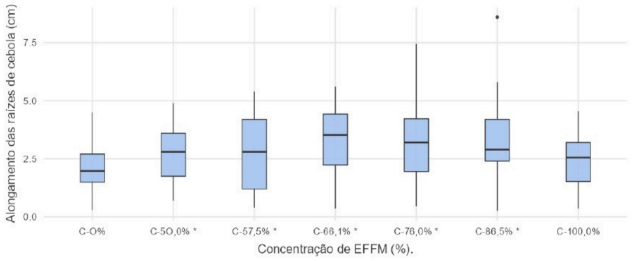


Figura 10. Alongamento das raízes de *A. cepa* no ensaio definitivo. * Diferença significativa em relação ao controle (Mann-Whitney, $p < 0,05$)

As comparações pareadas pelo teste de Mann-Whitney indicaram diferenças significativas entre o controle e as concentrações de 50%, 57,5%, 66,1%, 76,0% e 86,5% de EFFM ($p < 0,05$), enquanto a concentração de 100% não diferiu significativamente do controle ($p = 0,106$). Em conjunto, esses resultados evidenciam uma resposta não monotônica, caracterizada pelo estímulo do alongamento radicular em concentrações intermediárias e pela redução desse estímulo na maior concentração avaliada, compatível com um padrão hormético.

A resposta bifásica observada em *A. cepa* é compatível com uma resposta hormética, caracterizada pela estimulação biológica em baixas ou médias doses, seguida por redução do efeito estimulatório em concentrações mais elevadas. Segundo Calabrese e Baldwin (2002), esse padrão representa uma resposta adaptativa dos organismos a estressores ambientais e tem sido descrito para diferentes espécies vegetais expostas a metais potencialmente tóxicos. Salinitro *et al.* (2021), por exemplo, observaram respostas horméticas semelhantes em espécies herbáceas cultivadas sob concentrações moderadas de Cd, Cr e Pb.

Eruca sativa

A análise descritiva demonstrou aumento consistente do alongamento radicular em todas as concentrações de EFFM, com medianas variando entre 3,65 e 4,60 cm, em comparação ao controle (2,40 cm) (Figura 11).

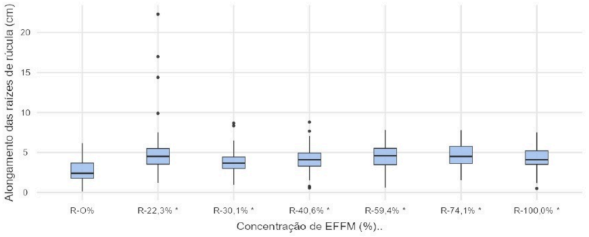


Figura 11. Alongamento das raízes de *E. sativa* no ensaio definitivo. * Diferença significativa em relação ao controle (Mann-Whitney, $p < 0,05$)

As comparações pareadas pelo teste de Mann-Whitney indicaram diferenças significativas entre o controle e todas as concentrações avaliadas ($p < 0,001$). Em conjunto, esses resultados demonstram estímulo persistente do crescimento radicular em toda a faixa de concentrações testadas, sem evidência de efeito inibitório mesmo na concentração máxima de EFFM, caracterizando uma resposta compatível com hormese.

O estímulo persistente observado em *E. sativa* sugere elevada tolerância ao elutriato durante o desenvolvimento inicial das plântulas. Resultados semelhantes foram descritos por Orupõld *et al.* (2022), que observaram índices de germinação superiores ao controle para diferentes espécies expostas ao elutriato da fração fina de aterros sanitários, indicando baixa fitotoxicidade e, em alguns casos, estímulo ao crescimento radicular. Da mesma forma, Singh &

Chandel (2022) verificaram que frações finas estabilizadas de aterros com maior tempo de disposição favoreceram o crescimento vegetal, sugerindo redução da fitotoxicidade ao longo do processo de estabilização dos resíduos.

Síntese comparativa

As respostas ao elutriato de EFFM evidenciaram um gradiente espécie-dependente, no qual E. sativa apresentou a maior tolerância, seguida por *A. cepa* e *S. lycopersicum*, que se mostrou a espécie mais sensível. A dissociação entre germinação e alongamento radicular demonstra que os efeitos do elutriato manifestaram-se predominantemente como respostas subletais, comprometendo o desenvolvimento inicial das plântulas sem afetar a viabilidade das sementes. Esse resultado confirma o alongamento radicular como endpoint mais sensível para avaliação de fitotoxicidade, conforme descrito por Hou *et al.* (2014), Ling *et al.* (2015), Visioli *et al.* (2014) e Sales Junior *et al.* (2024).

A Figura 12 sintetiza essas respostas ao apresentar a mediana do alongamento radicular em função da concentração de EFFM.

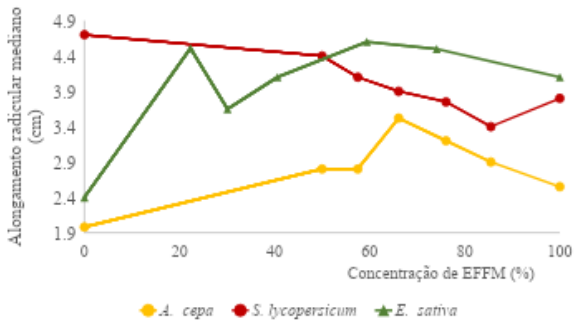


Figura 12. Mediana do alongamento radicular das espécies avaliadas em função das concentrações de EFFM selecionadas para cada ensaio definitivo.

A Figura 13 complementa essa análise por meio do Índice de Alongamento Radicular (IER), permitindo comparar o grau de fitotoxicidade entre espécies segundo os critérios de Bagur-González *et al.* (2011).

A interpretação do IER evidenciou respostas contrastantes entre as espécies avaliadas. *E. sativa* apresentou valores positivos de IER em todas as concentrações avaliadas (0,22 a 0,87), indicando elevada tolerância da espécie ao elutriato. Em *A. cepa*, os valores de IER permaneceram próximos de zero (-0,04 a -0,20), caracterizando predominantemente ausência de fitotoxicidade ou toxicidade baixa.

Embora o crescimento radicular tenha sido estimulado em concentrações intermediárias, a redução dos valores de IER nas concentrações mais elevadas indica atenuação desse efeito, em concordância com a resposta não monotônica descrita anteriormente.

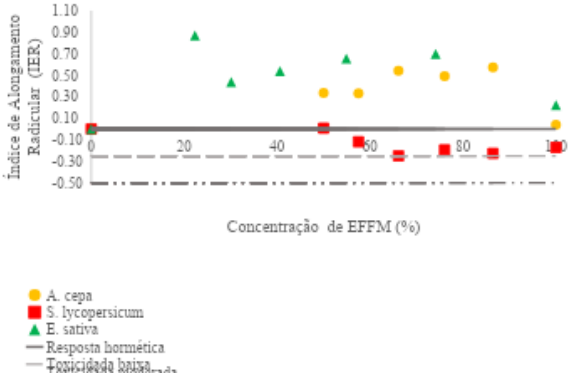


Figura 13. Índice de Alongamento Radicular (IER) das três espécies em função da concentração de EFFM. Nota: Valores positivos de IER indicam resposta hormética; valores negativos indicam fitotoxicidade crescente conforme Bagur-González *et al.* (2011). Os valores observados restringiram-se às faixas de resposta hormética, toxicidade baixa e toxicidade moderada.

Esse comportamento é compatível com respostas horméticas descritas para espécies vegetais expostas a concentrações moderadas de metais-traço (Salinitro *et al.*, 2021), embora, no presente estudo, a resposta observada resulte da exposição ao conjunto de constituintes presentes no elutriato da FFM.

Em contraste, *S. lycopersicum* apresentou redução progressiva do IER com o aumento da concentração de EFFM. Os valores permaneceram majoritariamente na faixa de toxicidade baixa, atingindo o limiar de toxicidade moderada apenas na concentração de 66,12% de EFFM.

Essa maior sensibilidade também encontra respaldo em estudos ecotoxicológicos que demonstram respostas espécie-dependentes à exposição a elutriatos contaminados. Silva *et al.* (2025), por exemplo, observaram efeitos tóxicos para algumas espécies vegetais e respostas estimulantes para outras, evidenciando que a intensidade e a direção dos efeitos dependem das características fisiológicas de cada organismo.

Em conjunto, os resultados obtidos pelo alongamento radicular e pelo IER demonstram que a resposta ao EFFM foi fortemente dependente da espécie vegetal. Enquanto *E. sativa* apresentou maior tolerância e estímulo persistente do crescimento radicular, *A. cepa* exibiu resposta compatível com hormese e *S. lycopersicum* mostrou maior sensibilidade ao material avaliado.

Esses achados reforçam a importância da utilização de múltiplas espécies vegetais em ensaios

ecotoxicológicos, uma vez que diferentes organismos respondem de maneira distinta à biodisponibilidade dos contaminantes presentes no elutriato.

CONCLUSÃO

Este estudo avança na avaliação ecotoxicológica da Fração Fina do Minerado (FFM) ao investigar, de forma comparativa e multiespécies, os efeitos de seu elutriato (EFFM) sobre parâmetros sensíveis do desenvolvimento inicial vegetal. Ao demonstrar que os efeitos se concentram predominantemente no crescimento radicular, e não na germinação, o trabalho evidencia a importância de parâmetros subletais como indicadores mais sensíveis para a detecção de alterações fisiológicas precoces associadas a materiais residuais.

A integração entre análise estatística apropriada ao delineamento experimental e índices ecotoxicológicos permitiu identificar padrões distintos de resposta entre as espécies, revelando respostas espécie-dependentes, incluindo padrões compatíveis com resposta hormética em *Allium cepa* e *Eruca sativa* e tendência predominantemente inibitória em *Solanum lycopersicum*. Essa diferenciação reforça a necessidade de abordagens multiespécies na avaliação de resíduos complexos, especialmente quando se considera sua potencial aplicação ambiental.

Do ponto de vista científico, o estudo amplia o entendimento sobre os efeitos biológicos do EFFM, ainda pouco explorados na literatura, e fornece subsídios experimentais que podem contribuir para futuras avaliações e decisões técnicas relacionadas ao reaproveitamento ambiental da FFM. A demonstração de respostas espécie-dependentes e não lineares acrescenta complexidade e realismo à análise de risco, evitando interpretações simplificadas baseadas apenas em parâmetros letais.

Os resultados demonstram que a avaliação baseada exclusivamente na germinação poderia subestimar os efeitos biológicos do EFFM, reforçando a importância da inclusão de endpoints subletais em protocolos ecotoxicológicos destinados à avaliação de materiais provenientes da mineração de aterros sanitários.

Além disso, embora não haja comprometimento da viabilidade germinativa, o EFFM induz respostas distintas no desenvolvimento radicular em função da concentração e da espécie exposta, o que deve ser considerado em cenários de aplicação prática. Ensaios crônicos em matriz sólida e testes com espécies utilizadas na revegetação de aterros, como *Brachiaria decumbens*, são recomendados para aprofundar a avaliação da segurança ambiental.

Em conjunto, os resultados evidenciam que a interpretação da fitotoxicidade do EFFM depende tanto da escolha do endpoint quanto da espécie utilizada nos ensaios. A adoção de abordagens multiespécies associadas a parâmetros subletais mostrou-se essencial para detectar respostas biológicas que permaneceriam ocultas quando apenas a germinação é considerada. Esses achados fornecem suporte experimental para futuras avaliações ecotoxicológicas, análises de risco e estratégias voltadas ao reaproveitamento ambiental da FFM.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

ACLD: Conceituação, Investigação, Metodologia, Redação – rascunho original; **TBJ**: Obtenção de financiamento, Redação e Revisão, **ACSV**: Conceituação, Curadoria dos dados, Redação e Revisão. Todos os autores editaram o manuscrito.

REFERÊNCIAS

Alexandre, D. S., Ogura, A. P., da Silva Pinto, T. J., Soares, M. B., Alleoni, L. R. F., Montagner, C. C., de Oliveira Zacharias, T., Dias, M. A., & Espíndola, E. L. G. (2023). Biochar from sugarcane straw reduces the toxicity of soils contaminated with 2,4-D and fipronil, isolated and in a mixture, on multispecies microcosms. Water, Air, & Soil Pollution, 234(10), 615. https://doi.org/10.1007/s11270-023-06629-6

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2021). NBR 15469: Ecotoxicologia — Coleta, preservação e preparo de amostras. ABNT.

Bagur-González, M. G., Estepa-Molina, C., Martín-Peinado, F., & Morales-Ruano, S. (2011). Toxicity assessment using Lactuca sativa L. bioassay of the metal(loid)s As, Cu, Mn, Pb and Zn in soluble-in-water saturated soil extracts from an abandoned mining site. Journal of Soils and Sediments, 11(2), 281–289. https://doi.org/10.1007/s11368-010-0285-4

Bożym, M. (2020). Assessment of phytotoxicity of leachates from landfilled waste and dust from foundry. Ecotoxicology, 29, 429–443. https://doi.org/10.1007/s10646-020-02197-1

Burlakovs, J., Kaczala, F., Vincevica-Gaile, Z., Rudovica, V., Orupõld, K., Stapkevica, M., Bhatnagar, A., Kriipsalu, M., Hogland, M., Klavins, M., & Hogland, W. (2016). Mobility of

metals and valorization of sorted fine fraction of waste after landfill excavation. Waste and Biomass Valorization, 7(3), 593–602. https://doi.org/10.1007/s12649-016-9478-4

Calabrese, E. J., & Baldwin, L. A. (2002). Defining hormesis. Human & Experimental Toxicology, 21(2), 91–97. https://doi.org/10.1191/0960327102ht217oa

Chandana, N., Goli, V. S. N. S., Mohammad, A., & Singh, D. N. (2021). Characterization and utilization of landfill-mined-soil-like-fractions (LFMSF) for sustainable development: A critical appraisal. Waste and Biomass Valorization, 12(2), 641–662. https://doi.org/10.1007/s12649-020-01052-y

Chelinho, S., Pereira, C., Breitenbach, P., Baretta, D., & Sousa, J. P. (2019). Quality standards for urban waste composts: The need for biological effect data. Science of the Total Environment, 694, 133602. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133602

Cicirma, M., Dumitru, M., Georgescu, S. E., & Neagoe, A. (2025). Phytotoxicity assessment of Solanum lycopersicum L. seedlings moderately irrigated with non-thermal plasma treated water containing sulfamethoxazole. Plants, 14(9), 1277. https://doi.org/10.3390/plants14091277

Duarte, A. C. L., Jesus, T. B., Silva, A. P., Melo, S. L., & Bomfim, T. O. (2025). Determinação da composição gravimétrica como ferramenta na tomada de decisão em projeto de mineração de aterro sanitário: Estudo de caso de aterro em Recôncavo da Bahia. In Anais do 33º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Brasília, DF, Brasil. https://abes-dn.org.br/anaiseletronicos/33cbesa/728_tema_iii.pdf

Esguerra, J. L., Laner, D., Svensson, N., & Krook, J. (2021). Landfill mining in Europe: Assessing the economic potential of value creation from generated combustibles and fines residue. Waste Management, 126, 221–230. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.013

Faitli, J., Nagy, S., Romenda, R., Gombkötő, I., Bokányi, L., & Barna, L. (2019). Assessment of a residual municipal solid waste landfill for prospective 'landfill mining'. Waste Management & Research, 37(12), 1229–1239. https://doi.org/10.1177/0734242X19881197

Goli, V. S. N. S., Singh, P., Singh, D. N., & Tak, L. K. (2022). Investigations on characteristics of landfill-mined-soil-like-fractions and their dependency on organic matter. Process Safety and Environmental Protection, 162, 795–812. DOI: 10.1016/j.psep.2022.04.052

Hofstätter, K., Schneider, S. I., Altissimo, C. S., Bauchspiess, K., Medeiros, R. C., Clasen, B. E., Prestes, O. D., Zanella, R., & Golombieski, J. I. (2024). Water quality, pesticides, and phytotoxicity in seeds of Lactuca sativa, Solanum lycopersicum, and Eruca sativa. International Journal of Environmental Science and Technology, 21(7), 5971–5980. https://doi.org/10.1007/s13762-023-05381-y

Hou, J., Liu, G.-N., Xue, W., Fu, W.-J., Liang, B.-C., & Liu, X.-H. (2014). Seed germination, root elongation, root-tip mitosis, and micronucleus induction of five crop plants exposed to chromium in fluvo-aquic soil. Environmental Toxicology and Chemistry, 33(3), 671–676. https://doi.org/10.1002/etc.2489

Jain, M., Kumar, A., & Kumar, A. (2023). Landfill mining: A review on material recovery and its utilization challenges. Process Safety and Environmental Protection, 169, 948–958. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.049

Jones, P. T., Geysen, D., Tielemans, Y., Van Passel, S., Pontikes, Y., Blanpain, B., Quaghebeur, M., & Hoekstra, N. (2013). Enhanced landfill mining in view of multiple resource recovery: A critical review. Journal of Cleaner Production, 55, 45–55. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.021

Kaartinen, T., Sormunen, K., & Rintala, J. (2013). Case study on sampling, processing and characterization of landfilled municipal solid waste in the view of landfill mining. Journal of Cleaner Production, 55, 56–66. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.036

Kaczala, F., Mehdinejad, M. H., Lääne, A., Orupõld, K., Bhatnagar, A., Kriipsalu, M., & Hogland, W. (2017). Leaching characteristics of the fine fraction from an excavated landfill: Physico-chemical characterization. Journal of Material Cycles and Waste Management, 19(1), 294–304. https://doi.org/10.1007/s10163-015-0418-3

Khelil, M. N., Dimessi, R. G., Mahmoudi, M., & Hachicha, M. (2022). Phytotoxic effect of treated wastewater on seed germination and percent root elongation inhibition in some vegetable crops. Journal of Scientific Research and Reports, 28–36. https://doi.org/10.9734/jsrr/2022/v28i930546

Klauck, C., Rodrigues, M., & Silva, L. (2015). Evaluation of phytotoxicity of municipal landfill leachate before and after biological treatment. Brazilian Journal of Biology, 75(2 Suppl.), 57–62. https://doi.org/10.1590/1519-6984.1813

Krook, J., & Baas, L. (2013). Getting serious about mining the technosphere: A review of recent landfill mining and urban mining research. Journal of Cleaner Production, 55, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.043

Krook, J., Svensson, N., & Eklund, M. (2012). Landfill mining: A critical review of two decades of research. Waste Management, 32(3), 513–520. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.015

Lääne, A. (2014). Ecotoxicity of fine fraction from the Kudjape landfill [Master's thesis, Estonian University of Life Sciences]. DSpace. https://dspace.emu.ee/items/85fb6fc7-ee2e-4058-a752-ea627b2f4575

Leme, M. A. G., Takeda, C. M., Silva, K. G., Silva, J. C. V., & Miguel, M. G. (2021). Gravimetric characterization of Brazilian municipal solid waste mined from landfill for assessment of reuse potential. In 18th International Symposium on Waste Management and Sustainable Landfilling, Cagliari, Sardinia, Italy.

Ling, T., Meiying, G., & Jun, R. (2015). Effects of cadmium on seed germination, coleoptile growth, and root elongation of six pulses. Polish Journal of Environmental Studies, 24, 295–299. https://doi.org/10.15244/pjoes/29942

Lyu, J., Park, J., Kumar Pandey, L., Choi, S., Lee, H., De Saeger, J., Depuydt, S., & Han, T. (2018). Testing the toxicity of metals, phenol, effluents, and receiving waters by root elongation in Lactuca sativa L. Ecotoxicology and Environmental Safety, 149, 225–232. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.006

Masi, S., Caniani, D., Grieco, E., Lioi, D. S., & Mancini, I. M. (2014). Assessment of the possible reuse of MSW coming from landfill mining of old open dumpsites. Waste Management, 34(3), 702–710. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.12.013

Mersoni, C., & Reichert, G. A. (2017). Comparação de cenários de tratamento de resíduos sólidos urbanos por meio da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida: O caso do município de Garibaldi, RS. Engenharia Sanitária e Ambiental, 22(5), 863–875. https://doi.org/10.1590/s1413-41522017150351

Moreira, R., Sousa, J. P., & Canhoto, C. (2008). Biological testing of a digested sewage sludge and derived composts. Bioresource Technology, 99(17), 8382–8389. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.046

Orupõld, K., Somani, M., Kaczala, F., Hogland, M., Bhatnagar, A., Hogland, W., Saaremäe, E., & Kriipsalu, M. (2022). Ecotoxicity assessment of fine fractions obtained from landfill mining. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 26(4), 04022030. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000715

Pan, M., & Chu, L. M. (2016). Phytotoxicity of veterinary antibiotics to seed germination and root elongation of crops. Ecotoxicology and Environmental Safety, 126, 228–237. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.027

Parida, D., Ramana, G. V., & Datta, M. (2024). Investigation on trommeled legacy waste from full-scale mining of old dumpsites: Suitable for valorization or scientific disposal? Journal of Environmental Management, 356, 120580. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120580

Parrodi, J. C. H., Höllen, D., & Pomberger, R. (2018). Characterization of fine fractions from landfill mining: A review of previous investigations. Detritus, 2(1), 46. https://doi.org/10.31025/2611-4135/2018.13663

Patel, K. S., Pandey, P. K., Martín-Ramos, P., Corns, W. T., Varol, S., Bhattacharya, P., & Zhu, Y. (2023). A review on arsenic in the environment: Contamination, mobility, sources, and exposure. RSC Advances, 13(13), 8803–8821. https://doi.org/10.1039/D3RA00789H

Pehme, K.-M., Orupõld, K., Kuusemets, V., Tamm, O., Jani, Y., Tamm, T., & Kriipsalu, M. (2020). Field study on the efficiency of a methane degradation layer composed of fine fraction soil from landfill mining. Sustainability, 12(15), 6209. https://doi.org/10.3390/su12156209

Prechthai, T., Padmasri, M., & Visvanathan, C. (2008). Quality assessment of mined MSW from an open dumpsite for recycling potential. Resources, Conservation and Recycling, 53(1–2), 70–78. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.09.002

Rede, D., Santos, L. H. M. L. M., Ramos, S., Oliva-Teles, F., Antão, C., Sousa, S. R., & Delerue-Matos, C. (2016). Ecotoxicological impact of two soil remediation treatments in Lactuca sativa seeds. Chemosphere, 159, 193–198.https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.

2016.06.002

Sales Junior, S. F., da Silva, E. O., Mannarino, C. F., Correia, F. V., & Saggioro, E. M. (2024). A comprehensive overview on solid waste leachate effects on terrestrial organisms. Science of the Total Environment, 915, 170083. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170083

Salinitro, M., Mattarello, G., Guardigli, G., Odajiu, M., & Tassoni, A. (2021). Induction of hormesis in plants by urban trace metal pollution. Scientific Reports, 11(1), 20329. https://doi.org/10.1038/s41598-021-99657-3

Scheutz, C., Pedersen, G. B., Costa, G., & Kjeldsen, P. (2009). Biodegradation of methane and halocarbons in simulated landfill biocover systems containing compost materials. Journal of Environmental Quality, 38(4), 1363–1371.https://doi.org/10.2134/jeq2008.0170

Silva, C., Ré, A., Abrantes, N., Gonçalves, F. J. M., & Pereira, J. L. (2025). Ecotoxicological assessment of sediment samples impacted by wastewater treatment plant effluents transporting contaminants of emerging concern. Journal of Xenobiotics, 15(4), 132. https://doi.org/10.3390/jox15040132

Singh, A., & Chandel, M. K. (2022). Physicochemical and biological assessment of legacy waste for application as soil conditioner. Environmental Science and Pollution Research, 30(11), 29699–29710.https://doi.org/10.1007/s11356-022-24295-9

Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. (2022). Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos: 2021. Secretaria Nacional de Saneamento, Ministério do Desenvolvimento Regional.http://antigo.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2020/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_RS_SNIS_2021.zip

Šourková, M., Adamcová, D., Zloch, J., Skutnik, Z., & Vaverková, M. D. (2020). Evaluation of the phytotoxicity of leachate from a municipal solid waste landfill: The case study of Bukov landfill. Environments, 7(12), 111. https://doi.org/10.3390/environments7120111

Słomczyńska, B., & Słomczyński, T. (2004). Physico-chemical and toxicological characteristics of leachates from MSW landfills. Polish Journal of Environmental Studies, 13, 627–637.

Somani, M., Datta, M., Ramana, G., & Sreekrishnan, T. (2018). Investigations on fine fraction of aged municipal solid waste recovered through landfill mining: Case study of three dumpsites from India. Waste Management & Research, 36(8), 744–755.https://doi.org/10.1177/0734242X18782393

Somani, M., Datta, M., Ramana, G. V., & Sreekrishnan, T. R. (2019). Leachate characteristics of aged soil-like material from MSW dumps: Sustainability of landfill mining. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 23(4), 04019014.https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000452

Somani, M., Hölzle, I., Datta, M., & Ramana, G. V. (2023). An investigation on mobility of heavy metals for assessing the reusability of soil-like material reclaimed from mining of municipal solid waste dumpsites. Waste Management, 167, 113–121.https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.028

Takeda, C. M., de Godoy Leme, M. A., Romeiro, D. C., Silva, K. G., & Miguel, M. G. (2022). Variation of the gravimetric composition of landfilled municipal solid waste over the time in a developing country. International Journal of Environmental Research, 16(5), 83.https://doi.org/10.1007/s41742-022-00463-0

Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., & Teixeira, W. G. (Eds.). (2017). Manual de métodos de análise de solo (3ª ed.). Embrapa Solos.https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo

The jamovi project. (2024). jamovi (Version 2.6) [Computer software]. https://www.jamovi.org

Tiquia, S. M. (2000). Evaluating phytotoxicity of pig manure from the pig-on-litter system. In Proceedings of the Second International Composting Symposium (pp. 625–647). CBA Press.http://www-personal.umd.umich.edu/~smtiquia/publications/BC1-2000-PDF.pdf

Van Passel, S., Dubois, M., Eyckmans, J., De Gheldere, S., Ang, F., Tom Jones, P., & Van Acker, K. (2013). The economics of enhanced landfill mining: Private and societal performance drivers. Journal of Cleaner Production, 55, 92–102.https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.024

Visioli, G., Conti, F. D., Gardi, C., & Menta, C. (2014). Germination and root elongation bioassays in six different plant species for testing Ni contamination in soil. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 92(4), 490–496. https://doi.org/10.1007/s00128-013-1166-5

Vocht, A. J. P., & Descamps, S. (2011). Biodiversity and enhanced landfill mining: Weighting local and global impacts. In Proceedings of the International Academic Symposium on Enhanced Landfill Mining (Extended Edition) (pp. 275–290). https://doi.org/10.13140/2.1.4969.8245

Vollprecht, D., Hernández Parrodi, J. C., Lucas, H. I., & Pomberger, R. (2020). Case study on enhanced landfill mining at Mont-Saint-Guibert landfill in Belgium: Mechanical processing, physico-chemical and mineralogical characterization of fine fractions less than 4.5 mm. Detritus, (10), 26–43. https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.13940

Wolfsberger, T., Nispel, J., Sarc, R., Aldrian, A., Hermann, R., Höllen, D., Pomberger, R., Budischowsky, A., & Ragossnig, A. (2015). Landfill mining: Development of a theoretical method for a preliminary estimate of the raw material potential of landfill sites. Waste Management & Research, 33(7), 671–680. https://doi.org/10.1177/0734242X15590473

Xiaoli, C., Shimaoka, T., Xianyan, C., Qiang, G., & Youcai, Z. (2007). Characteristics and mobility of heavy metals in an MSW landfill: Implications in risk assessment and reclamation. Journal of Hazardous Materials, 144(1–2), 485–491. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.10.056

Zhou, C., Gong, Z., Hu, J., Cao, A., & Liang, H. (2015). A cost-benefit analysis of landfill mining and material recycling in China. Waste Management, 35, 191–198. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.029

Zhou, C., Xu, W., Gong, Z., Fang, W., & Cao, A. (2015). Characteristics and fertilizer effects of soil-like materials from landfill mining. CLEAN – Soil, Air, Water, 43(6), 940–947. https://doi.org/ 10.1002/clen.201400510

Editor-in-Chief:
Jeamylle Nilin

Associate Editor:
Mauro Vilar